

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA RED DE SENSORES  
INALÁMBRICOS PARA CULTIVOS DE FRUTAS UTILIZANDO *BEAGLEBONE*  
*BLACK***

ANDRÉS CASTILLO GONZÁLEZ

Proyecto de grado presentado como requisito parcial  
para aspirar al título de Ingeniero Electrónico

Director

M.Sc. (C) Arley Bejarano Martínez

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
PEREIRA**

**2017**

<b>Tabla de contenido</b>	<b>Pag.</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	8
1.3 OBJETIVO GENERAL .....	9
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.5 ESTADO DEL ARTE.....	10
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
2.1 Red de sensores inalámbricos .....	12
2.2 Topología de red.....	12
2.3 Agricultura de precisión .....	13
<b>3. MATERIALES.....</b>	<b>14</b>
3.1 <i>BeagleBone Black</i> .....	14
3.2 Sensor de temperatura y humedad .....	15
3.3 Sensor de humedad de suelo .....	16
3.4 Camara LifeCam HD-3000 .....	17
3.5 Adaptador USB Inalámbrico TLWN723N.....	17
3.6 Router Rompemuros 2014 3 Antenas .....	18
3.7 Solar charger ES500.....	19
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>20</b>
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>28</b>
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>7. TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>42</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>43</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Tipos de topologías de red [4].	13
Figura 2. Módulo <i>BeagleBone Black</i>	14
Figura 3. Modulo del sensor DHT22.	15
Figura 4. Modulo del sensor SEN0114	16
Figura 5. Cámara USB LifeCam HD-3000	17
Figura 6. Modulo USB Inalámbrico TLWN723N	17
Figura 7. Rompemuros 2014 3 Antenas	18
Figura 8. Cargador panel Solar charger ES500	19
Figura 9. Circuito de acondicionamiento para el sensor SEN0114.	21
Figura 10. Circuito de acondicionamiento para el sensor SEN0114 montado en PCB con conectores para la <i>BeagleBone Black</i> y el sensor DHT22.	21
Figura 11. Página Web con la dirección IP de configuración del Router Rompemuros 2014 3 Antenas.	23
Figura 12. Estructura de las tablas de la base de datos.	24
Figura 13. Diagrama de flujo del funcionamiento del servidor central con la WSN.	25
Figura 14. Diagrama de flujo del funcionamiento de un nodo de la WSN con la <i>BeagleBone Black</i> .	26
Figura 15. Un nodo del prototipo de la red de sensores inalámbricos.	28
Figura 16. Señal de la corriente de un nodo con el adaptador de 5 V.	29
Figura 17. Señal de la tensión de un nodo con el adaptador de 5 V.	29
Figura 18. Señal de la corriente de un nodo con el cable conectado al cargador de panel solar sin núcleo de ferrita.	30
Figura 19. Señal de la tensión de un nodo con el cable conectado al cargador de panel solar sin núcleo de ferrita.	31
Figura 20. Señal de la corriente de un nodo con el cable conectado al cargador de panel solar con núcleo de ferrita.	32
Figura 21. Señal de la tensión de un nodo con el cable conectado al cargador de panel solar con núcleo de ferrita.	32
Figura 22. Imagen adquirida de una planta de aguacate sana.	33
Figura 23. Imagen adquirida de una panta de aguacate enferma.	33
Figura 24. Imagen adquirida de una planta de moras sana.	34
Figura 25. Imagen adquirida de una panta de moras enferma.	34
Figura 26. Problema en la imagen adquirida con alto brillo.	35

Figura 27. Problema en la imagen adquirida con bajo brillo.....	35
Figura 28. Problema en la imagen adquirida con distorsiones .....	36
Figura 29. Ejemplo1 de la imagen con el sistema actualizado.....	37
Figura 30. Ejemplo2 de la imagen con el sistema actualizado.....	38
Figura 31. Información obtenida de un nodo de la WSN de la base de datos MYSQL. ....	39

**Índice de tablas**

Tabla 1. Tiempo de adquisición de cada nodo. ....37

## Agradecimiento

Agradezco a la Universidad Tecnológica de Pereira por permitir ser parte de esta institución y por dar la oportunidad de ser un profesional, al director de la tesis Arley Bejarano Martínez M.Sc. (C) por los esfuerzos, dedicación y el apoyo durante todo el proceso universitario, y por guiar el desarrollo con todas sus capacidades y por tener la confianza conmigo. A los profesores que apoyaron en el proceso de aprendizaje, especialmente a Leidy Pamplona M.Sc. (C) y al director de la carrera M.Sc. Andrés Felipe Calvo por brindar sus valiosos conocimientos y el acompañamiento a lo largo de la carrera. Por último, agradezco a mi familia por el apoyo y la motivación desde el principio, especialmente a mi madre por siempre estar conmigo en los momentos importantes en mi vida.

## 1. INTRODUCCIÓN

La agricultura Colombiana es una de las más importantes actividades para el desarrollo económico y social, ya que cuenta con múltiples ecosistemas que ofrecen diversas oportunidades de mercado. Durante la última década, las exportaciones colombianas se duplicaron debido al Tratado de Libre Comercio que se estableció entre Estados Unidos, generando una gran oportunidad de negocios para los agricultores colombianos [1]. Donde el valor de los productos se ha incrementado por la utilización de nuevos dispositivos y nuevas técnicas que se han desarrollado para facilitar la siembra y el riego de los cultivos en Colombia, pero aún siguen siendo las personas encargadas de monitorear, mantener y controlar el estado de forma manual y así evitando pérdidas mayores.

En la actualidad, se han desarrollado áreas de la ingeniería como la agricultura de precisión, la cual tiene como filosofía el manejo óptimo de los cultivos, donde utiliza diferentes tipos de tecnología, por ejemplo las redes de sensores inalámbricas (WSN por sus siglas en inglés Wireless Sensor Networks) [2 3 8 9]. Una red consiste en la implementación de dispositivos distribuidos (nodos), espaciados y autónomos que posibilitan la adquisición de diferentes variables físicas como la temperatura, la humedad, entre otras. La información de las señales medidas se transmite a un servidor central con el fin de realizar un registro para monitoreo, control y el estado en diferentes áreas, como: monitoreo de estructuras y construcciones, sistemas de defensa, aplicaciones biomédicas, control de fronteras, detección de terremotos, sistemas de control automático a nivel industrial, control de almacenes, detección de gases, entre otros [6 10 11 12].

Sin embargo, las redes de sensores presentan un alto consumo energético generado por la conexión de varios sensores y por el procesamiento de la información. Además, la fidelidad del canal de comunicación y el almacenamiento en tiempo real de la información, generan errores en el proceso de fusión y de operación causando que los registros estén desincronizados [2]. Para el monitoreo y la detección temprana de enfermedades o plagas en el cultivo se han utilizado redes de cámaras inalámbricas [7]. No obstante, estas redes son costosas y necesitan una fuente de alimentación distinta. Debido a esto, el diseño e implementación de dichos sistemas representa un desafío [2 8 9].

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es uno de los países con mayor biodiversidad del mundo, gracias a su clima tropical, permite el cultivo de diferentes frutos ofreciendo diversas oportunidades de mercadeo. En la actualidad, con la proliferación de tecnologías en procesamiento digital de señal, sistemas de instrumentación y control, se han desarrollado áreas de la ingeniería como la agricultura de precisión, la cual tiene como filosofía el manejo óptimo de un cultivo [2 3]. Una parte fundamental es la construcción de un sistema de monitoreo de cultivos por medio de una red de sensores inalámbricos.

El desarrollo del hardware y el software en una red necesita varias consideraciones tales como el consumo energético, en el cual los nodos deben subsistir el mayor tiempo posible con baterías o con fuentes de energía alternativas para realizar el sensado y el procesamiento de los datos, también la fidelidad del canal de comunicación y almacenamiento en tiempo real, donde los nodos pueden generar errores en el proceso de fusión y de operación de los datos. Si no se tiene una óptima comunicación y el proceso es lento causa que los registros de los datos estén desincronizados. Además, se han utilizado cámaras para el monitoreo para el monitoreo y la detección temprana de enfermedades o plagas en los cultivos en las redes, pero, no obstante, son costosas y necesitan una fuente de alimentación distinta [7].

En este trabajo se realizará el diseño y la implementación de un prototipo de una red de sensores para cultivos de fruta, utilizando tecnologías de bajo costo. Transmitiendo la información a un servidor central, obteniendo un registro y control del estado del cultivo, generando una base de datos para el usuario.



## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Uno de los problemas actuales en los cultivos son los factores climáticos que aumenta la producción de las enfermedades y las plagas causando impactos significativos en la economía en el sector agropecuario. Donde el usuario necesita realizar un tipo de control del estado de las plantas, pero la mayoría de los procedimientos se hace en forma empírica, sin ningún tipo de tecnología que permita obtener la información necesaria para el cuidado del cultivo. Además, no siempre estará presente en todo tiempo para realizar este tipo de control causando que la producción sea lenta, poco óptima y aumentada su costo.

Actualmente se está desarrollando un plan llamado “Colombia siembra”, donde uno de los objetivos es fortalecer el desarrollo tecnológico y los servicios en el sector agropecuario, permitiendo mejorar la producción para el país y fomentar las exportaciones [21].

En este proyecto tiene como motivo mejorar la calidad del monitoreo en cultivos de frutas utilizando la proliferación de la tecnología, permitiendo obtener la información del estado del cultivo al usuario en forma rápida y óptima. Además en el grupo de Investigación de Ingeniería Electrónica necesita tener la base de datos del estado del cultivo para construir un modelo de aprendizaje supervisado para la detección de enfermedades en los cultivos de fruta.

### 1.3 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un prototipo de una red de sensores inalámbricos para cultivos de frutas utilizando *BeagleBone Black*

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un sistema de instrumentación y medida de variables de temperatura, humedad relativa, humedad de suelo y captura de imágenes que haga parte de un nodo de una red de sensores inalámbricos.
- Diseñar una red de cuatro nodos distribuidos en un cultivo de frutas comunicados a un servidor central.
- Generar un sistema de administración de datos que permita la consulta de la información adquirida del cultivo.

## 1.5 ESTADO DEL ARTE

Las redes de sensores inalámbricos se han aplicado en distintas áreas, tanto en la medicina como la agricultura. A continuación se mencionara algunas aplicaciones y diseños de estas redes realizadas en instituciones educativas.

En la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá diseñó e implemento una WSN usando protocolo 6LoWPAN (Adaptacion entre el IPv6 y IEEE 802.15.4) y el protocolo de enrutamiento RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks), donde obtuvieron un sistema de monitorio genérico capaz de adaptar diferentes tipos de sensores y la capacidad de interconectar una cantidad de nodos. Este sistema fue empleado en un cultivo urbano con sensores de luminosidad, temperatura y humedad [6]. En la Universidad politécnica de Cartagena en España propuso una arquitectura general de las WNS para el monitoreo de cultivos hortícolas, implementado por medio del protocolo de acceso al medio B-MAC(Berkeley Medium Access Control) donde se aseguraron un alto grado de autonomía del nodo. Además utilizaron varios sensores especializados (Soil-Mote, Environmental-Mote y Water-Mote). Al final, este sistema se implementó en un cultivo real para verificar y validar los resultados obtenidos [6]. En Chennai, India, realizaron una WSN que permite automatizar un sistema de riego en un cultivo, optimizando el uso del agua. Este sistema contiene sensores de humedad de suelo y temperatura colocados en el campo del cultivo, controlados por un microcontrolador y comunicándose por el protocolo Zig Bee. Además, diseñaron un algoritmo que permite controlar la cantidad de agua. Este sistema utiliza un panel solar como alimentación, una interfaz Cellular-internet para la inspección de los datos y una cámara inalámbrica que se fija en el campo para controlar el área de enfermedades mediante técnicas de procesamiento de imágenes. Este sistema es de bajo costo y de energía autónoma para áreas geográficamente aisladas y limitadas [7]. En la universidad Nirma, Ahmedabd en la India, realizaron una implementación de un sistema de telemedicina de bajo costo que integra la detección, almacenamiento y difusión de diversos parámetros biomédicos de los pacientes de un hospital, utilizando sensores biomédicos, una unidad de computación (BeagleBone Black) y varios software libres: Linux, Apache Server, MySQL y PHP. Donde el sistema desarrollado satisface el objetivo de mejorar la atención a los pacientes [10]. En Colombia, la universidad del Cauca diseñó una WSN para la agricultura de precisión en cultivos de café, aplicando el estándar IEEE 802.15.4. Donde la arquitectura consiste en: tres

nodos que utilizan sensores para temperatura y humedad del suelo, temperatura de las hojas, radiación solar y flujo fotosintético usando un radio XBee 802.15.4; el nodo coordinador posee una estación climatológica y un modem GSM que se encarga de enviar la información a un servidor central. El diseño de este sistema presento un buen desempeño trasmitiendo satisfactoriamente los datos al servidor localizado en la ciudad de Popayán, Colombia [13].

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Red de sensores inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos (*Wireless sensor networks*, WSN) es una red conformada por dispositivos con sensores que están distribuidos en un área específica (nodos). Para realizar el monitoreo e interacción de ciertos parámetros y cambios de uno o varios fenómenos físicos. Estos sistemas están interconectados de manera inalámbrica, enviando los datos adquiridos a un servidor central para luego realizar un análisis. Esta red contiene una alta gama de aplicaciones que contribuyen de manera potencial a la industria, la ciencia, el transporte, la seguridad y la infraestructura [9 10 11 12].

### 2.2 Topología de red

Se refiere a la configuración del hardware y su distribución para transmitir los datos. Para ciertas circunstancias puede ser óptima o inapropiada, dependiendo de su configuración. Se divide en varias opciones, por ejemplo: Topología en Estrella, Topología en Malla, Topología híbrida Malla–Estrella y entre otras, como se observa en la Figura 1[4 8 9].

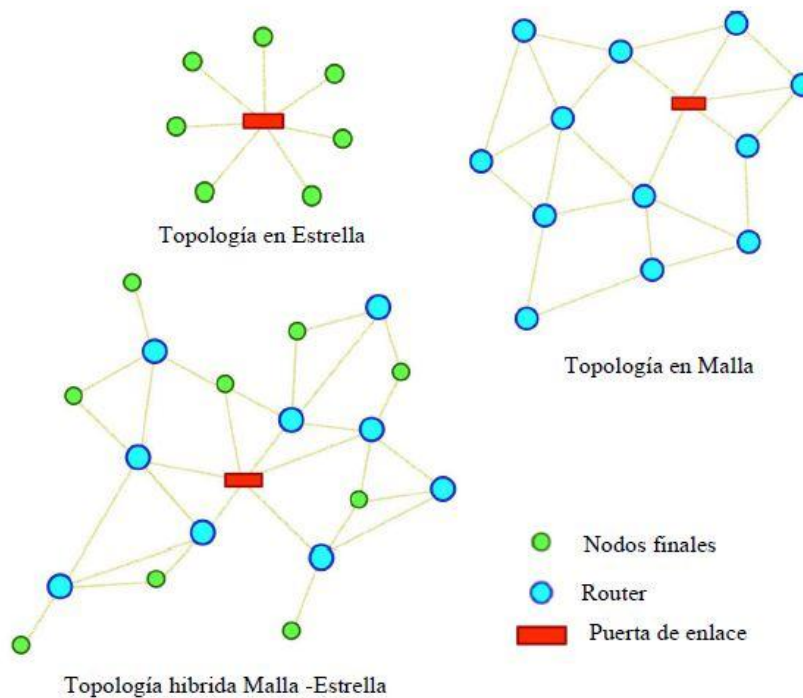


Figura 1. Tipos de topologías de red [4].

Dónde:

- Los nodos finales son los dispositivos que contiene los sensores y/o actuadores que permiten capturar la información de diferentes variables físicas.
- Routers son los dispositivos que permite la conexión entre los nodos al servidor central por un protocolo de comunicación.
- Puertas de enlace es el dispositivo que recibe la información de los nodos, en este caso es el servidor central.

### 2.3 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión se basa en utilizar tecnologías de información espacial, tales como los sistemas de posicionamiento global y sistemas de información geográfica para mejorar las decisiones agronómicas de diferentes cultivos, permitiendo optimizar la productividad y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental [2 8 9].

### 3. MATERIALES

#### 3.1 *BeagleBone Black*

Es un sistema embebido de tamaño de una tarjeta de crédito, bajo costo y bajo consumo eléctrico de la familia *BeagleBoard*, Figura 2. Fue diseñada con la filosofía de open source software y hardware para múltiples aplicaciones. Sus características son: una CPU ARM Cortex-A8 a 1 GHz, acelerador gráfico 3D, 512 MB de DDR3 RAM ,4 GB de almacenamiento interno, ranura para microSD, puerto USB, Ethernet, micro-HDMI y dos conectores de 46 pines GPIO (General Purpose Input/Output). Contiene un sistema operativo base Linux, por defecto Debian, pero se puede instalar otros sistemas. Además se controla con varios lenguajes de programación, como C++, Java, Python, entre otros [14].



Figura 2. Módulo *BeagleBone Black*

### 3.2 Sensor de temperatura y humedad

El sensor DHT22 es un dispositivo conformado por dos sensores: un sensor de humedad capacitivo y un termistor, Figura 3. Contiene de un circuito integrado básico en el interior que realiza la conversión de analógico-digital y envía estos datos en forma de señal digital. Este dispositivo tiene una excelente calidad y rápida respuesta [15].

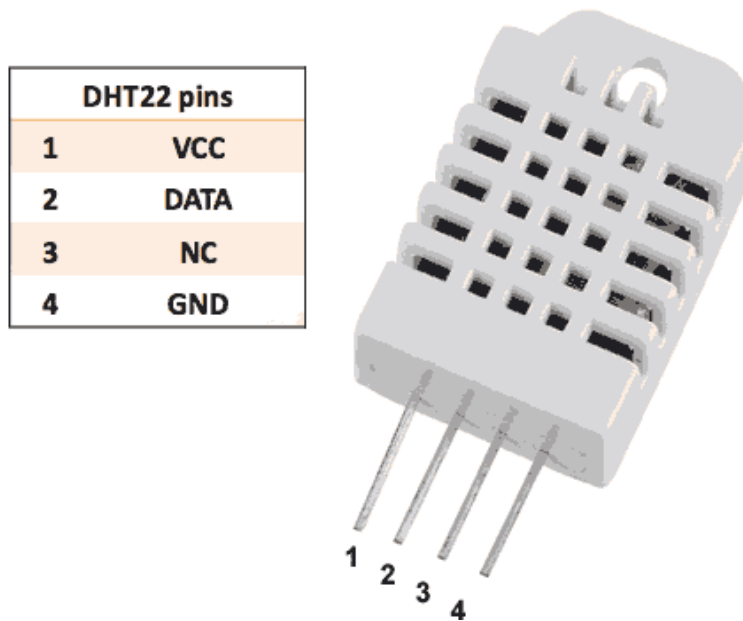


Figura 3. Módulo del sensor DHT22

Estos son sus principales características

Alimentación: 3.3v – 5.5v

Salida digital a través de un solo bus.

Tiempo de muestreo de 2 segundos.

Rango de valores desde -40°C hasta 80°C de temperatura.

Precisión:  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  como máximo en condiciones adversas.

Rango de valores desde 0% hasta 100% de Humedad Relativa.

Precisión:  $\pm 2\% \text{RH}$ , a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ .

Tamaño: 38x20mm.



### 3.3 Sensor de humedad de suelo

El sensor de humedad de suelo SEN0114 puede leer la cantidad de humedad presente en el suelo que lo rodea. Es de baja tecnología, pero es ideal para el seguimiento de un jardín urbano, Figura 4.



Figura 4. Modulo del sensor SEN0114

Utiliza dos sondas para pasar corriente a través del suelo, y luego se lee la resistencia para obtener el nivel de humedad. Más agua hace que el suelo conduzca la electricidad con mayor facilidad, mientras que el suelo seco es lo contrario [16]. Estos son sus principales características

Fuente de alimentación: 3,3 V o 5 V

Señal de salida de tensión: 0 ~ 4.2v

Corriente: 35mA

Tamaño: 60x20x5mm.

Rango de valores:

- 0 ~ 1.5 v: suelo seco.
- 1.5 v ~ 3.5 v : suelo húmedo.
- 3.5 v ~ 4.2 v : en el agua.

### 3.4 Camara LifeCam HD-3000

Esta cámara de alta definición (HD de 720p) con tecnología TrueColor que proporciona un vídeo de colores brillantes y vívidos, además, contiene formato de 16:9 que ofrece grabación de video y entrada de USB 2.0 [17], Figura 5.



Figura 5. Cámara USB LifeCam HD-3000

### 3.5 Adaptador USB Inalámbrico TLWN723N

Es un adaptador USB con la tecnología inalámbrica 802.11b/g/n, con tasas de transmisión de datos de hasta 150 Mbps permitiendo rápidas conexiones inalámbricas y fácil encriptación de seguridad inalámbrica WPA con presionar el botón WPS [18], Figura 6.



Figura 6. Modulo USB Inalámbrico TLWN723N

### 3.6 Router Rompemuros 2014 3 Antenas

Es una estación inalámbrica de Alta Potencia (1000mW de Potencia de transmisión), compatible con los estándares de la IEEE 802.11b, 802.11g y 802.11n estos en conjunto con sus tres antenas pueden alcanzar velocidades de transmisión de hasta 300Mbps, Figura 7. Con este router permite la conexión de la red de sensores con el servidor central de forma inalámbrica, además, este puede transmitir la señal inalámbrica a una distancia de aproximadamente más de 1 Km al aire libre [19].



Figura 7. Rompemuros 2014 3 Antenas

### 3.7 Solar charger ES500

Es un cargado de panel solar portátil de 5000 mAh con dos salidas de USB de + 5V a 1 Amperio. Es resistente al agua, a prueba de golpes y ligero debido a su tamaño, Figura 8 [20].



Figura 8. Cargador panel Solar charger ES500

## 4. METODOLOGÍA

La finalidad de este proyecto es diseñar e implementar un prototipo de una red de sensores inalámbricos para un cultivo de fruta utilizando un sistema embebido, porque este reúne varios componentes que se ha posicionado en varias ramas de la ciencia con múltiples aplicaciones. Existen varios sistemas embebidos, la cual se escogió la *Beaglebone Black*, porque presenta mejor rendimiento en comparación con otros, como: alto desempeño, bajo costo, bajo consumo energético, alto procesamiento y entre otras.

Inicialmente se realizó un código que permitió el funcionamiento del sensor DHT22 en la *Beaglebone Black*, utilizando librerías específicas creada por Tony DiCola en Adafruit Industries con licencia de MIT [22], para adquirir la información de la temperatura y la humedad relativa del ambiente. Donde se conectó en el pin P9\_14 (GPIO\_40) del sistema embebido.

Después, se realizó el acondicionamiento para el sensor de humedad de suelo SEN0114 con un amplificador operacional LM324, donde es alimentada por el pin P9\_06 (+5V(VDD)) y en configuración como seguidor de tensión para acoplar la impedancia del sensor, Figura 9. La salida del amplificador esta conecta a un divisor de tensión que esta representa por la ecuación 1, permitiendo que la máxima tensión del sensor este en el rango de 0 a 1.6 V. Por último, la salida del divisor se conecta al AIN3 (ADC) pin P9\_40 de la *Beaglebone Black*. Con el diseño completado, se realizó el montaje de este circuito, Figura 10, en una PCB de doble capa de cobre con una maquina ProtoMat E33 de LDKF disponible en la universidad.

$$V_{out} = \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} * V_{in} \quad (1)$$

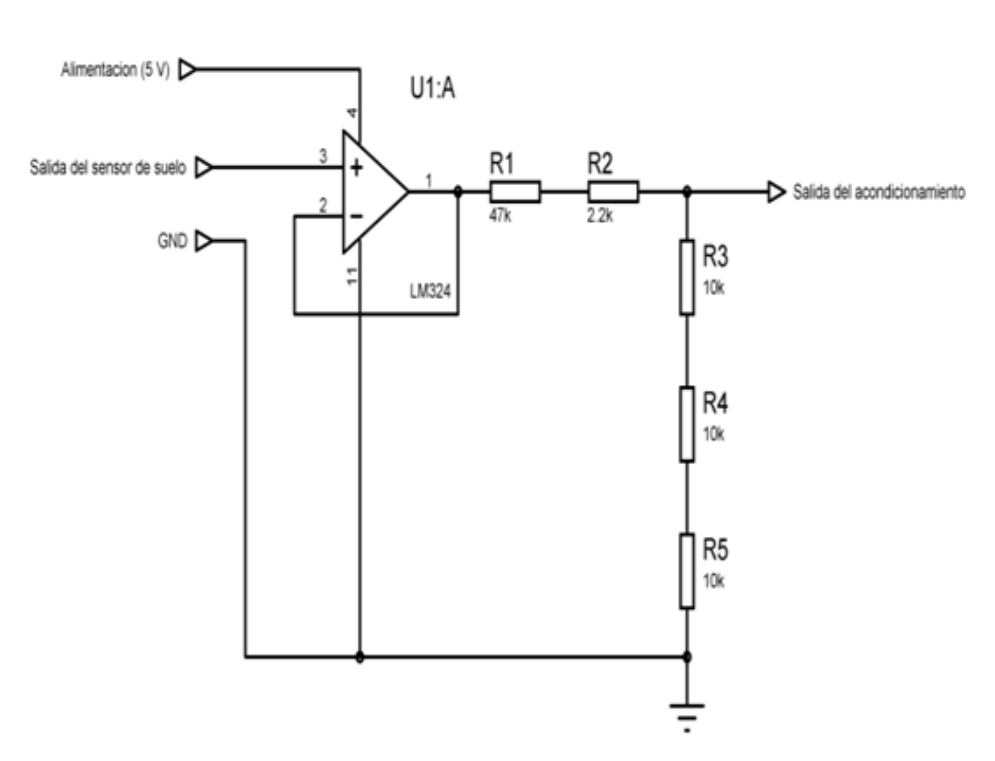


Figura 9. Circuito de acondicionamiento para el sensor SEN0114

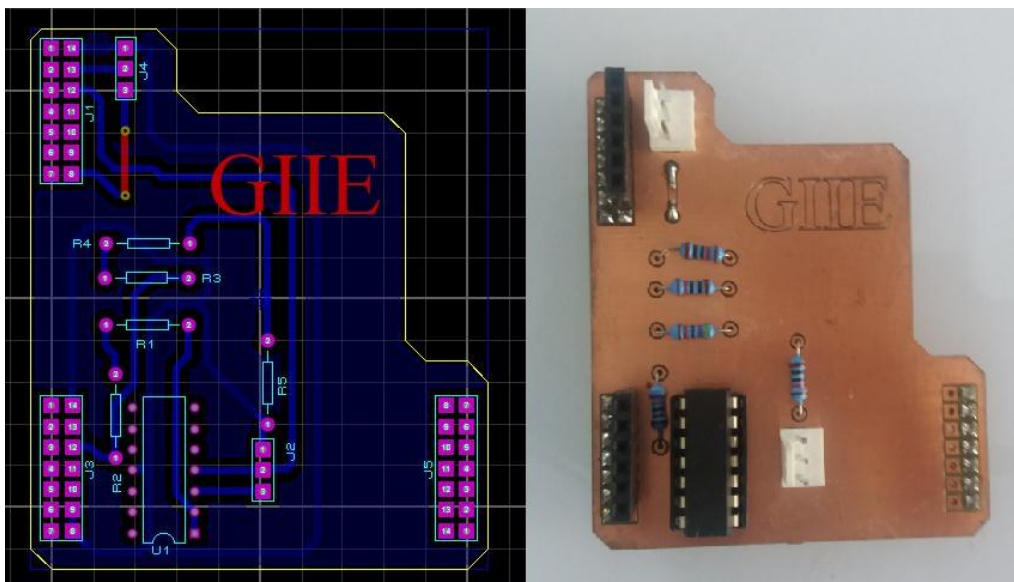


Figura 10. Circuito de acondicionamiento para el sensor SEN0114 montado en PCB con conectores para la *BeagleBone Black* y el sensor DHT22.

Para adquirir la información de este sensor, se utilizó la librería BlackLib C++ diseñada por Yigityuce con licencia pública de GNU [23], esta permite configurar los periféricos que contiene la *BeagleBone Black* en lenguaje C++. Donde se realizó un algoritmo para el funcionamiento del ADC para adquirir el valor que entrega el sensor.

Para la Camara LifeCam HD-3000, se usó la librería Highgui de Opencv, donde su código abierto permite el diseño de aplicaciones enfocadas en la visión por computador y aprendizaje máquina en cualquier tipo de sistema operativo y sistema embebido [24].

Pero antes de realizar la captura, lo primero que se realizó es actualizar todos los paquetes del sistema operativo e instalar el Opencv. Además, se instaló la librería V4L2 (Video4Linux 2) que contiene el kernel de necesario para el manejo de las cámaras USB [25]. Ya teniendo todo configurado, se realizó un código que permitió capturar una imagen desde la *Beaglebone Black*.

Después de configurar los sensores, se siguió con el adaptador USB WIFI Tp-LINK WN723N. Donde se instaló el driver rtl8188eu permitiendo funcionamiento de este dispositivo con un sistema base Linux, donde se descargó por la página GitHub por el usuario lwfinger [26]. Al instalarlo y conectar adaptador a *Beaglebone Black*, se modificó el archivo `/etc/network/interface`, agregando las siguientes líneas:

```
auto wlan0
iface wlan0 inet dhcp
    wpa-ssid "NOMBRE DE LA RED"
    wpa-psk "CLAVE DE LA RED"
```

Al guardar y reiniciar la *Beaglebone Black*, se comprobó el funcionamiento de este dispositivo USB al conectar a una red creada por medio de la dirección IP de configuración del Router Rompemuros 2014 3 Antenas, Figura 11.

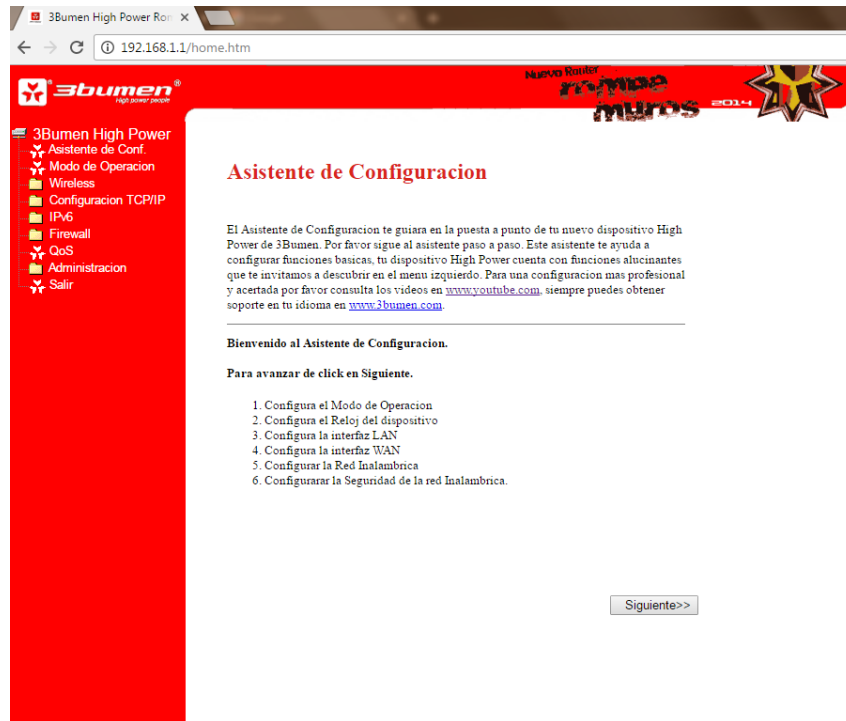


Figura 11. Página Web con la dirección IP de configuración del Router Rompemuros 2014 3 Antenas

Al comprobar la conectividad entre la *Beaglebone Black* y la red, se obtuvo el primer prototipo de un nodo de la WSN. Luego se realizó los mismos procedimientos para el diseño de otros 4 nodos, ya obteniendo el prototipo de la WSN.

Con el diseño completado del hardware, se respaldó por un software bien configurado. El entorno de toda la red se realizó con el sistema operativo base Linux. La base de datos se creó por medio de MYSQL en un computador personal (servidor central) con Ubuntu 12.04 y configurada una red local para este prototipo de diseño. Cada una de las *Beaglebone Black* de la red contiene el sistema operativo Debian 7.5 con las librerías necesarias como OpenCV y MYSQL en lenguaje C++, permitiendo realizar el algoritmo de la adquisición.

La base de datos se creó en MYSQL usando el phpMyAdmin.php, donde es un sitio web de administración de datos que permite la consulta y modificación de la información contenida. Cada tabla contiene un nombre “Beagle\_#N”, donde #N es el número de cada *Beaglebone Black* que se utiliza. Donde estas contiene tablas secundarias que almacena la información del cultivo: la temperatura, la humedad relativa, humedad de suelo y la imagen, Figura 12.



Examinar	Estructura	SQL	Buscar	Insertar	Exportar	Importar	Privilegios	Operaciones	Seguimiento	Más
Estructura de tabla		Vista de relaciones								
#	Nombre	Tipo	Cotejamiento	Atributos	Nulo	Predeterminado	Extra	Acción		
<input type="checkbox"/>	1 N.Captura	int(11)			No	Ninguna	AUTO_INCREMENT			
<input type="checkbox"/>	2 Fecha y Hora	timestamp	on update CURRENT_TIMESTAMP		No	CURRENT_TIMESTAMP ON UPDATE CURRENT_TIMESTAMP				
<input type="checkbox"/>	3 Temperatura [°C]	float			Sí	NULL				
<input type="checkbox"/>	4 Humedad Relativa [%]	float			Sí	NULL				
<input type="checkbox"/>	5 Humedad de Suelo	varchar(16) utf32_spanish_ci			Sí	NULL				
<input type="checkbox"/>	6 Imagen	mediumblob			Sí	NULL				

Figura 12. Estructura de las tablas de la base de datos.

En la Figura 13, muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del servidor central. Cuando se inicia, este prepara la base de datos para recibir toda la información de la red. Se tiene un tiempo de espera, que sería la frecuencia de muestro de la adquisición información, donde se podrá configurar a diferentes tiempos por medio de un script en bash. Para este diseño se configuro un tiempo de 2 minutos. Después, el servidor central transmite un comando de ejecución permitiendo activar la toma de datos de la red de sensores de inalámbricos. Cada nodo enviara la información a diferentes tablas asignadas y guardándolos. Por último, este vuelve al tiempo de espera para luego realizar el mismo procedimiento anterior.

Cada nodo de la red, tendrá la misma configuración para el funcionamiento, como se observa el diagrama de flujo de la Figura 14. Cuando la *Beaglebone Black* inicia, este prepara los dispositivos que estén conectados por el puerto USB, la cámara USB y el adaptador WIFI. El siguiente paso es esperar la recepción del comando de ejecución que transmite el servidor central. Cuando es exitosa la recepción, este empieza a ejecutar un algoritmo realizado en lenguaje C++ que empieza adquirir la información de las variables asignadas por medio de los sensores y la transmisión hacia base de datos en MYSQL. Después se limpia la memoria de *Beaglebone Black* para después realizar otra adquisición cuando reciba la ejecución.

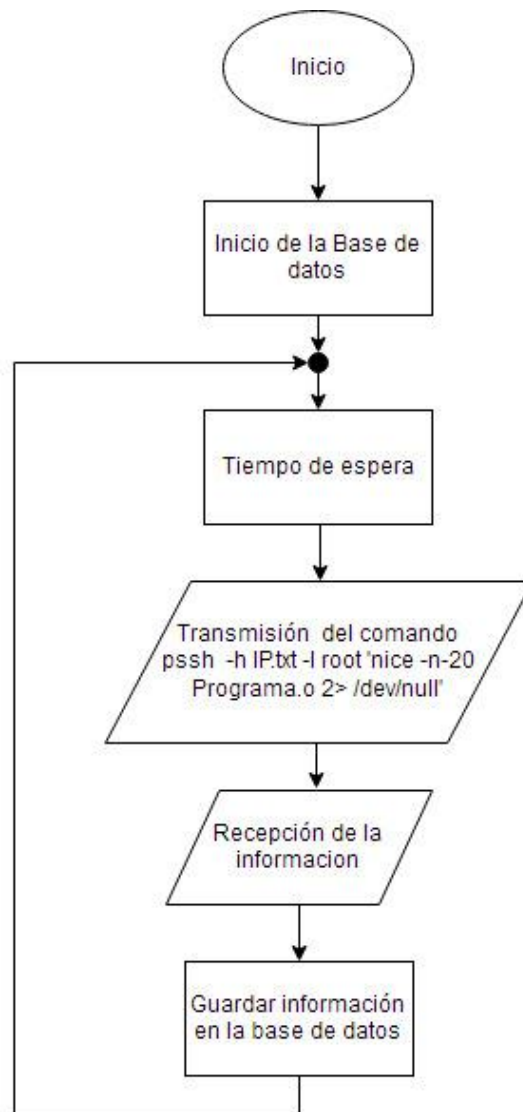


Figura 13. Diagrama de flujo del funcionamiento del servidor central con la WSN.

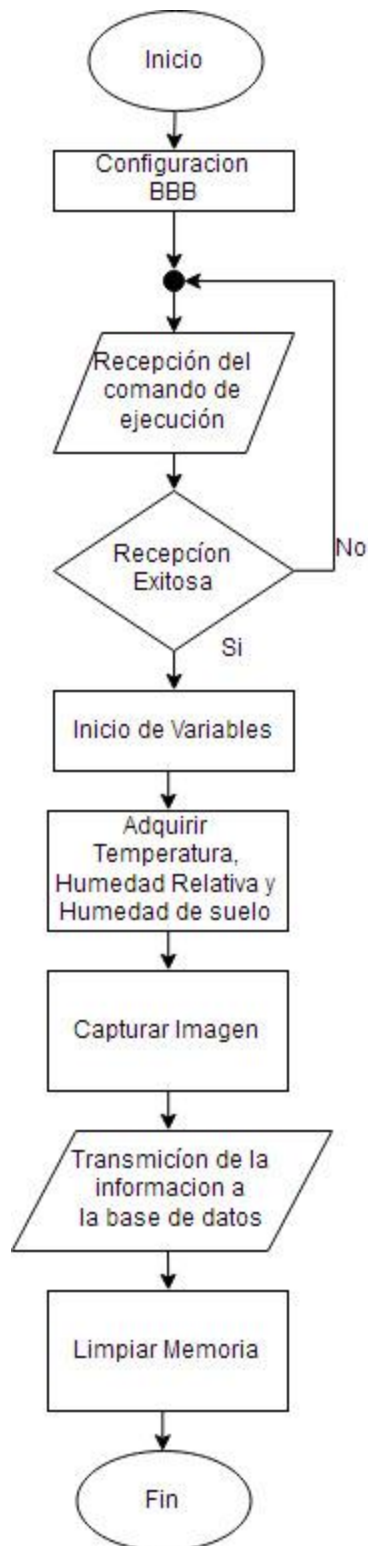


Figura 14. Diagrama de flujo del funcionamiento de un nodo de la WSN con la *BeagleBone Black*.

Teniendo el WSN con el algoritmo anterior, se realizaron pruebas en el laboratorio: observar el consumo energético de los paneles solares Solar charger ES500 conectadas a las *BeagleBone Black*, la fidelidad del canal de comunicación y almacenamiento de la información por la comunicación de los nodos y al servidor central con topología tipo estrella, utilizando el router Rompemuros 2014 3 Antenas. Por último se aplicó en dos cultivos de frutas, uno de aguacates y otro de moras adquiriendo la información para generar la base de datos.

## 5. RESULTADOS

- En la Figura 15 se muestra un nodo del prototipo de la WSN diseñado con la *BeagleBone Black*. Este prototipo de red tiene por el momento 4 nodos más, con las mismas características que el primero, para evaluar el desempeño de este sistema. Donde se implementó una topología de red tipo estrella para la comunicación entre el servidor central y se realizó pruebas en el laboratorio adquiriendo de las variables de temperatura, humedad relativa, humedad de suelo y una imagen con algoritmos desarrollado en lenguaje C++.

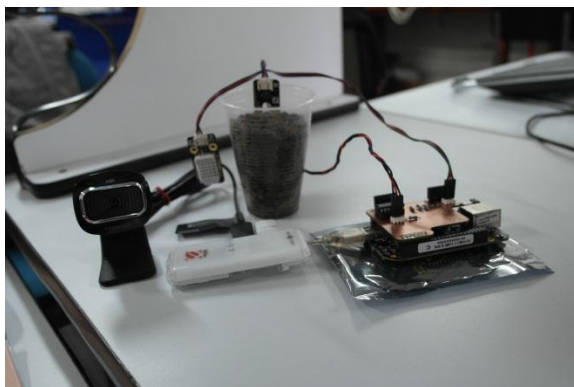


Figura 15. Un nodo del prototipo de la red de sensores inalámbricos.

- Las pruebas hechas en el laboratorio para el consumo energético, se encontró que en los nodos se reiniciaban o se apagaban sin que el cargador del panel solar este descargado. Para observar lo que sucede, se realizó una adquisición de datos de la corriente y tensión se suministra a las *BeagleBone Black* con tres tipos de elementos: un adaptador de 5 V, un cable que conecta el cargador de panel solar con la *BeagleBone Black* sin núcleo de ferrita y otro con núcleo de ferrita. En la Figura 16 y la Figura 17 se observa el comportamiento energético suministrado por un adaptador de 5 V por un tiempo largo, donde los picos de la señal es el momento que adquiere la información y enviándola a la base de datos. Estas señales son estables y no presentan ningún inconveniente.

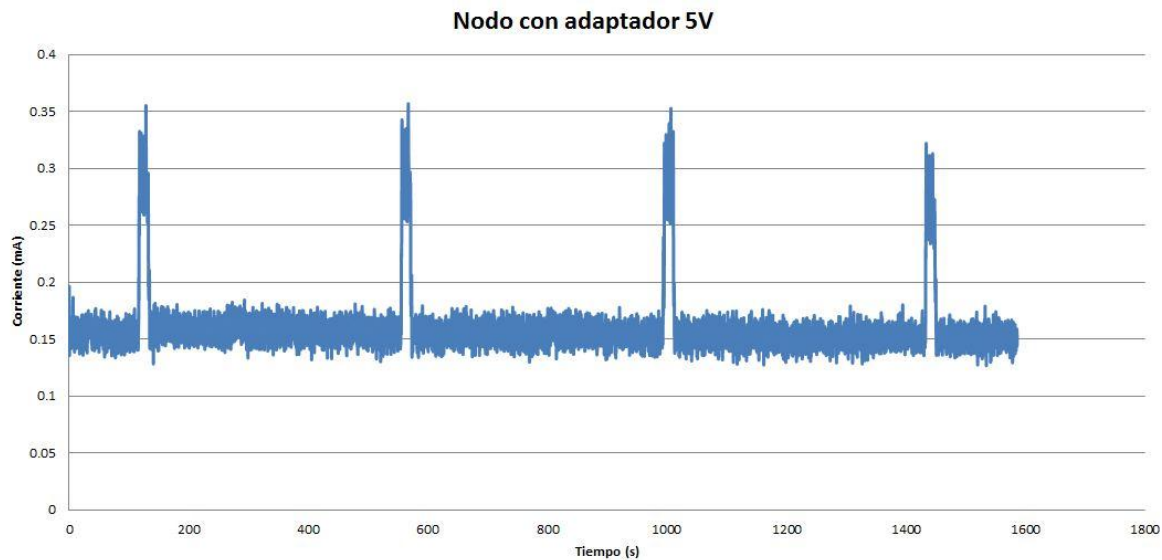


Figura 16. Señal de la corriente de un nodo con el adaptador de 5 V.

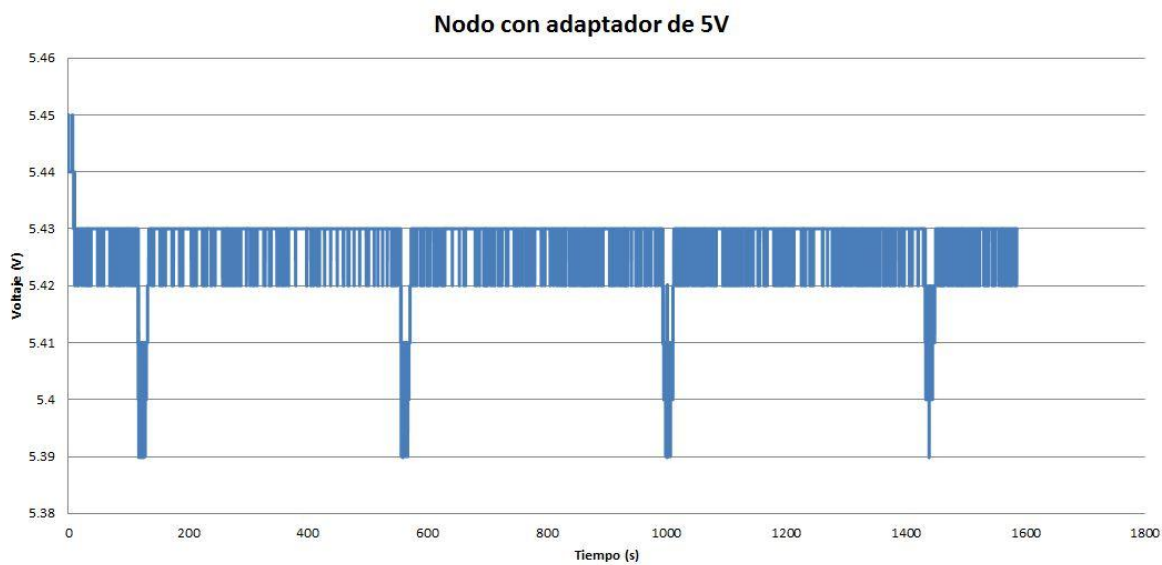


Figura 17. Señal de la tensión de un nodo con el adaptador de 5 V.

Pero las Figura 18 y Figura 19 se muestran las señales de corriente y tensión que suministra el cargador de panel solar con cable sin el núcleo de ferrita durante un periodo corto. Se observa que el comportamiento de estas señales es totalmente distinto con respecto al adaptador, debido a que el nodo cuando empieza adquirir la información exige más potencia. El cargador solar no es capaz de administrarla y llega un punto que reinicia la *BeagleBone Black* causando perdida de información, como se observa en el tiempo de 50 a 60 segundos de estas figuras. Esto es un problema que se obtuvo con los cargadores durante las pruebas en el laboratorio utilizando este cable sin núcleo de ferrita.

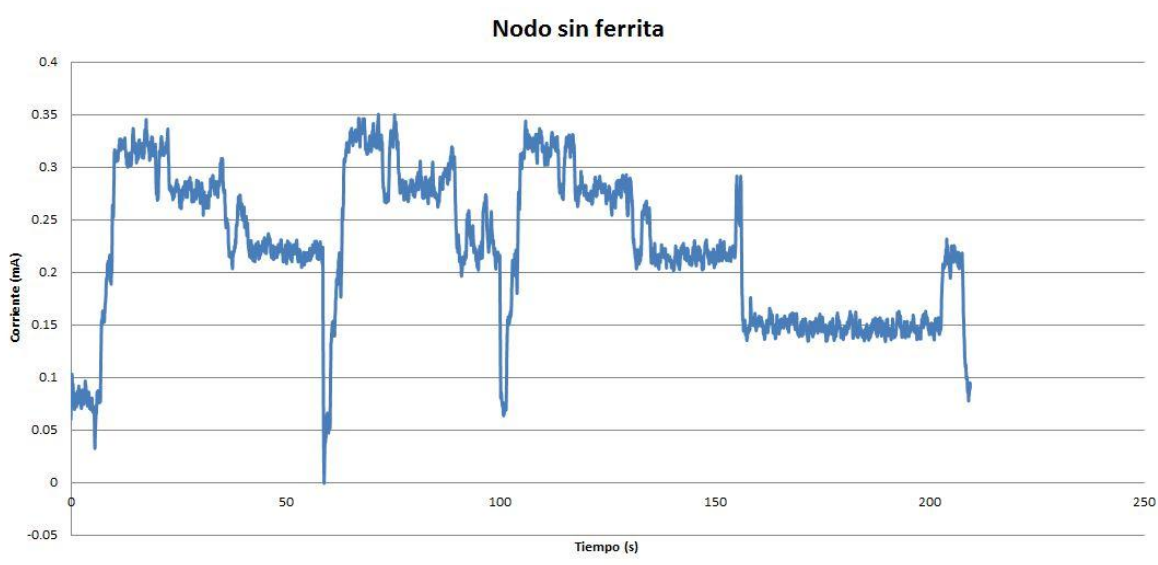


Figura 18. Señal de la corriente de un nodo con el cable conectado al cargador de panel solar sin núcleo de ferrita.



Figura 19. Señal de la tensión de un nodo con el cable conectado al cargador de panel solar sin núcleo de ferrita.

Una solución a este problema fue utilizar los cables que tenga un núcleo de ferrita, como se observa las señales de las Figura 20 y Figura 21. El comportamiento es estable y similar a las del adaptador, además, sucede lo mismo fenómeno con la señal corriente y la tensión cuando se empezar adquirir la información pero no se disminuye lo suficiente como el anterior caso, evitando que la *BeagleBone Black* se apague en un tiempo indeterminado. En el tiempo de 0 a 55 segundos aproximadamente fue cuando la *BeagleBone Black* se encendió y luego empezó adquirir información, luego se estabiliza y hasta que vuelve a realizar la adquisición, ya en el tiempo de 170 segundos en adelante se detuvo manualmente para observar la estabilidad de la corriente y tensión cuando este no está tomando datos. Aun así, se presenta el mismo problema de que el nodo se reinicie, se presentó cuando se realizaron las pruebas en el laboratorio y en la implantación en los cultivos, pero poca vez comparado con el anterior. Al pasar el tiempo, se observó que llega a un punto de que este problema no se presentan y el sistema funciona correctamente hasta que se descargar el cargador.



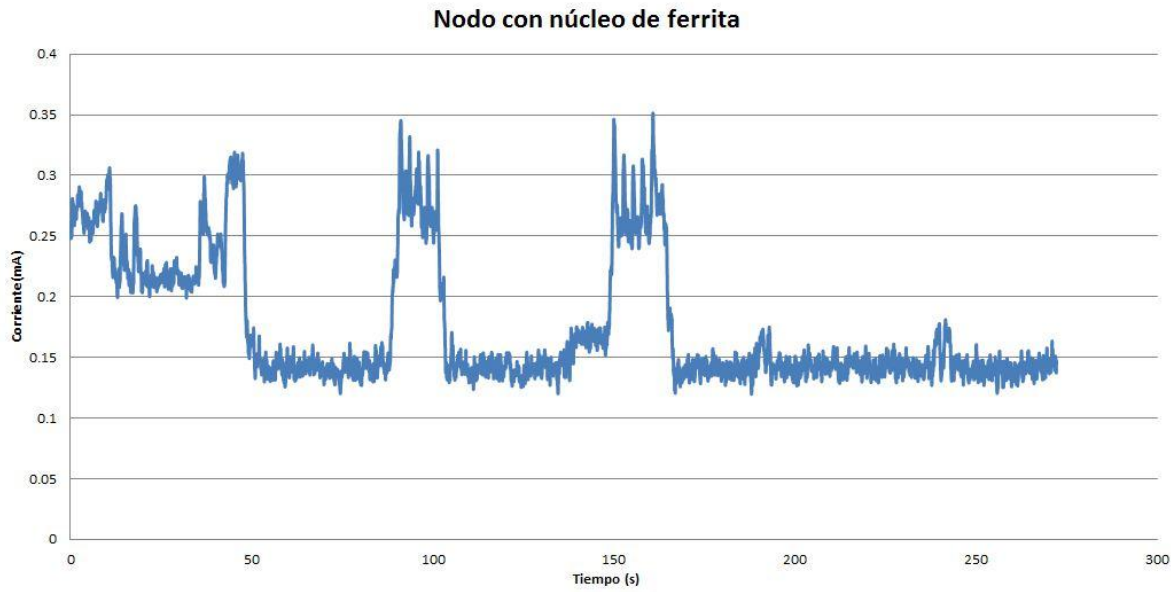


Figura 20. Señal de la corriente de un nodo con el cable conectado al cargador de panel solar con núcleo de ferrita.

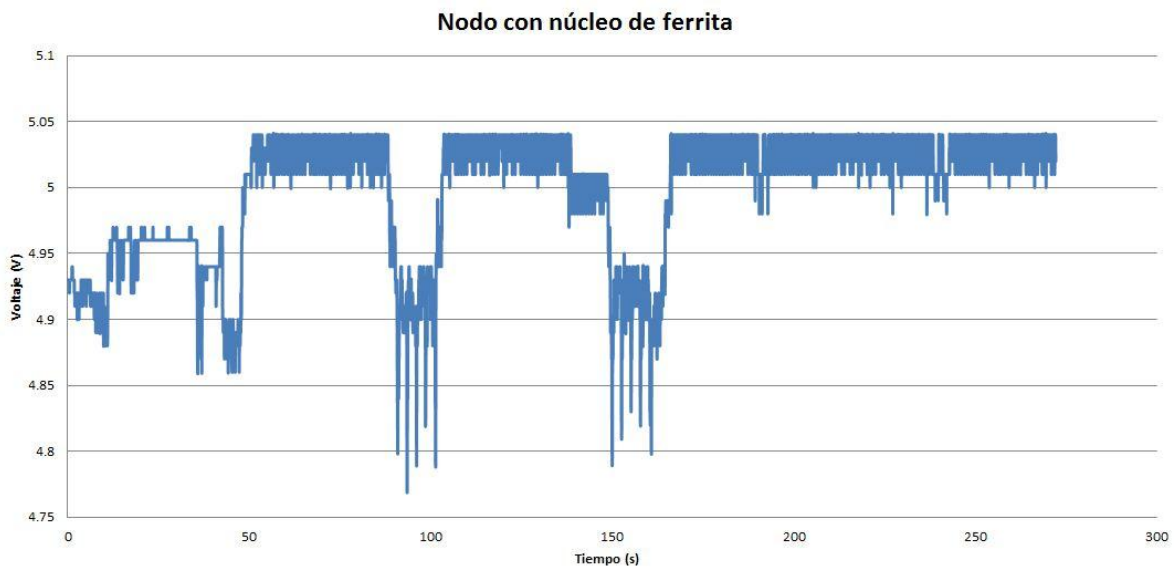


Figura 21. Señal de la tensión de un nodo con el cable conectado al cargador de panel solar con núcleo de ferrita.

- Se implementó este diseño en un cultivo de aguacates de una finca por Belén de Umbría. Donde se adquirió y generó la base de datos con información del ambiente e imágenes capturadas de varias plantas sanas y enfermas. En la Figura 22, muestra un ejemplo de la base de datos de una planta sana y la Figura 23 de una enferma.



Figura 22. Imagen adquirida de una planta de aguacate sana.



Figura 23. Imagen adquirida de una planta de aguacate enferma.

- Se implementó la WNS en un cultivo de moras en una finca por La Florida. Donde se adquirió y generó la base de datos con información del ambiente e imágenes capturadas de varias plantas sanas y enfermas con Antracnosis causada por la especie del género *Colletotrichum*. En la Figura 24 se muestra un ejemplo de una planta sana y la Figura 25 es la enferma.



Figura 24. Imagen adquirida de una planta de moras sana.



Figura 25. Imagen adquirida de una planta de moras enferma.

- Durante la adquisición de la información del cultivo, se encontraron dos problemas. Uno de ellos fue la distancia de transmisión de los datos del dispositivo TLWN723N al servidor central. Al realizar varias pruebas de distancia entre un nodo y el router Rompemuros, se encontró que este no es capaz de transmitir la información a una distancia mayor de 35 metros.

El otro problema fueron las cámaras LifeCam HD-3000 tomaban las imágenes con demasiado brillo o en otros casos muy bajos, como se observan en las Figura 26 y Figura 27. Además, tenía problemas con drive que contenía la *BeagleBone Black* para el manejo



de las cámaras USB, debido a que en algunas imágenes adquiridas presenta algunas distorsiones, como se observa en la Figura 28.



Figura 26. Problema en la imagen adquirida con alto brillo.



Figura 27. Problema en la imagen adquirida con bajo brillo.



Figura 28. Problema en la imagen adquirida con distorsiones

- Debido a estos problemas anteriores, se decidió actualizar el sistema operativo de las *BeagleBone Black* a una versión recientemente, Debian 8.6, para observar si se solucionan algunos de estos problemas mencionados anteriormente. Al cambiar por esta versión, se encontraron mejoras en parte de configuración y adquisición de los datos. Para la configuración del adaptador USB WIFI, no se necesitaba instalar el driver rtl8188eu ya que esta versión lo trae implementado y se configura por el comando `Connmanctl` [27]. La librería *BlackLib C++* no funciona correctamente para utilizar el ADC de la *BeagleBone Black* debido a que el kernel es una versión mejorada y maneja de forma distinta el registro para el uso de este periférico. Por consiguiente, se desarrolló una librería en C++ propia para realizar el manejo y adquisición de la señal analógica del sensor de humedad de suelo por medio del ADC. Por último, esta versión trae un driver mejorado compatible para las cámaras LifeCam HD-3000 solucionando el problema anterior.

Pero, se encontró otro tipo de problema, la memoria interna de la *BeagleBone Black* se llena cada 2KBytes en un tiempo indeterminado, debido a que un demonio se está ejecutando y llenándola, causando que tenga errores de espacio y esta daña el Debian obligando a uno formatear y reinstalar el sistema. Pero solo se presenta cuando las *BeagleBone Black* se utilizan varias veces en un largo tiempo. Aun así, esta mejora

permitió ser rápida al adquirir y enviar la información del cultivo en comparación con la versión anterior, como se observa en la Tabla 1 que son los tiempos aproximados que se obtuvieron. Además, fue probada para la toma de datos en los cultivos de moras adquiriendo excelentes resultados su funcionamiento, como se observa los ejemplos de la Figura 29 y Figura 30 .

	Tiempo de adquisición [s]				
	Nodo 1	Nodo2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5
Versión Antigua	153	155	148	143	145
Versión Actualizada	50	53	60	49	58

Tabla 1. Tiempo de adquisición de cada nodo.



Figura 29. Ejemplo1 de la imagen con el sistema actualizado.





Figura 30. Ejemplo2 de la imagen con el sistema actualizado.

- La utilización del software MYSQL como administrador de base de datos, permitió de forma sencilla el guardado de los datos para la WSN, debido a su versatilidad con entornos bases Linux. En la Figura **31**, se muestra la información adquirida de un nodo guardado en base de datos por medio de phpmyadmin.php, donde se observa la temperatura, humedad relativa, humedad de suelo y la imagen capturada, como los ejemplos de las plantas anteriores.

Servidor: localhost » Base de datos: CultivoP » Tabla: Beagle\_1

	Num_Captura	Fecha	Temperatura	Humedad_Relativa	Humedad_de_Suelo	Imagen
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	1	2017-02-27 11:08:14	30.7	51.5	Suelo en agua	[BLOB - 500.8 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	2	2017-02-27 11:09:28	30.9	57.4	Suelo en agua	[BLOB - 568.6 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	3	2017-02-27 11:10:34	30.9	58.5	Suelo en agua	[BLOB - 570 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	4	2017-02-27 11:12:22	30.8	58.5	Suelo en agua	[BLOB - 582 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	5	2017-02-27 11:13:26	30	54.5	Suelo en agua	[BLOB - 557.5 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	6	2017-02-27 11:16:00	29.9	60.2	Suelo en agua	[BLOB - 550.2 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	7	2017-02-27 11:17:48	30.4	60.9	Suelo en agua	[BLOB - 550.4 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	8	2017-02-27 11:20:08	30.4	60.8	Suelo en agua	[BLOB - 466.5 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	9	2017-02-27 11:21:20	29.9	59.3	Suelo en agua	[BLOB - 564.9 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	10	2017-02-27 11:22:22	29.9	59.2	Suelo en agua	[BLOB - 575.4 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	11	2017-02-27 11:23:25	29.6	59.3	Suelo en agua	[BLOB - 569.1 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	12	2017-02-27 11:24:34	30.2	59.1	Suelo en agua	[BLOB - 571.4 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	13	2017-02-27 11:30:24	30.8	56.2	Suelo en agua	[BLOB - 441.2 KB]
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	14	2017-02-27 11:31:36	30.8	56.1	Suelo en agua	[BLOB - 522.8 KB]

Consola

Figura 31. Información obtenida de un nodo de la WSN de la base de datos MYSQL.

- Uno de los objetivos del diseño de este prototipo es que fuese de bajo costo, debido a la utilización elementos comerciales que se adquieren sencillamente en un mercado electrónico o por vía internet.



## 6. CONCLUSIONES

- Se presentó el diseño de un prototipo de WSN en la agronomía, utilizando módulos *Beaglebone Black*, sensores y dispositivos inalámbricos. Donde se ha podido observar las facilidades que presenta este sistema para realizar la adquisición, el procesamiento de la información y la transmisión de los datos, debido a las características del hardware y software que contiene como sistema embebido y la utilización de cargadores solares permitió que este sistema sea autónomo y de fácil implementación, pero se debe tener en consideración las características eléctricas de estos dispositivos.
- El sistema operativo base Linux permitió la configuración y el procesamiento de la información de forma rápida y sencilla para diseño del prototipo de la red. Obteniendo posibilidades de interconectar redes con grandes cantidades de nodos en un futuro. Además, al actualizar a una versión reciente permite mejoras en sus aplicaciones, como el manejo de los periféricos, de los registros y el procesamiento de la información en los sistemas embebidos.
- Con el objetivo de realizar una correcta integración de los sensores que conforma el sistema de adquisición y su procesamiento, se debe considerar los niveles eléctricos de los diferentes dispositivos, creando así un sistema de acondicionamiento que garantice su correcto funcionamiento sin afectar o dañar ninguno de los componentes.
- La base de datos en MYSQL provee una facilidad de configuración y manejo de la información contenida. Además, el sistema de administración por medio del sitio web `phpmyadmi.php` que permite observar la información de forma ordenada y sencilla.
- Al utilizar los módulos inalámbricos TLWN723N, se comprobaron que la transmisión se realiza sin ningún problema a una distancia menor de 35 metros con la presencia de obstáculos como árboles o plantas que hace parte del cultivo.  
El estándar que maneja este módulo ofrece una solución económica y eficiente en diferentes aplicaciones, este caso se utilizó para la comunicación con el servidor central.
- Al observar los resultados obtenidos en las pruebas del laboratorio en el consumo energético del sistema. Se encontró que los cables que presentan núcleo de ferrita permiten mejorar el desempeño energético en este prototipo, además de realizar un filtrado de altas frecuencias a la corriente que ingresa.

- El diseño de un prototipo que se adecue a las necesidades del entorno garantiza una escalabilidad a la hora de integrar diferentes sensores, también cabe destacar que aunque en el mercado se encuentran diferentes dispositivos que cumplen con la labor de almacenar información del medio, estos no cuentan con cámaras las cuales son indispensables a la hora de determinar las enfermedades en las plantas ya que en un alto porcentaje se aprecian de manera visual.

## **7. TRABAJOS FUTUROS**

- Con la base de datos obtenida por la WSN, se pretende mejorar este sistema aplicando conceptos de aprendizaje de máquina, fusión de datos y procesamiento digital de imágenes, para que fuera autónomo y realice la detección de enfermedades y/o plagas en los cultivos, mejorado su calidad de producción.
- Diseñar varias carcazas para proteger cada nodo de acuerdo a las condiciones climáticas del entorno del lugar de su implementación.
- Implementar diferentes dispositivos y sensores al prototipo para obtener más información del estado de un cultivo.
- Emplear diferentes topologías de red para observar cual se adapta mejor al prototipo.
- Crear un sitio web o un App para celular que permite visualizar la información de la base de datos del cultivo.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1]NÚÑEZ, Jesus. El TLC con Estados Unidos y su impacto en el sector agropecuario Colombiano: Entre esperanzas e incertidumbres.[Online]. 2013, vol.1, no. 1. Available from Internet: <http://service.udes.edu.co/revistas/index.php/Lex-UNDES/article/P6.pdf> . ISSN: 2346-1578
- [2]S. Ivanov, K. Bhargava and W. Donnelly, "Precision Farming: Sensor Analytics," in *IEEE Intelligent Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 76-80, July-Aug. 2015.
- [3] J. Cedeño, M. Zambrano and C. Medina, "Redes inalámbricas de sensores eficientes para la agroindustria", *Prisma Tecnológico*, vol. 5, no. 1, pp. 22-25, 2014.
- [4] O. O. Jazmin, "Desarrollo De Un Prototipo De Adquisición De Variables Ambientales En Cultivos Hidropónicos De Lechuga, Mediante Una Red De Sensores, Utilizando Un Sistema Embebido", tesis M. Sc., Facultad De Ingeniería, Universidad De San Buenaventura, Bogotá D.C., Colombia, 2014.
- [5] W.E. Calderón, "Diseño e implementación de un sistema genérico de monitoreo usando redes de sensores inalámbricos con el protocolo 6LoWPAN", Trabajo de grado para título Magister en Ingeniería, Departamento de Ingeniería de sistemas e industrial, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2014.
- [6]López, J. A.; Garcia-Sanchez, A.-J.; Soto, F.; Iborra, A.; Garcia-Sanchez, F. & Garcia-Haro, J. "Design and validation of a wireless sensor network architecture for precision horticulture applications Precision Agriculture" ,*Precision Agriculture* 2011, Volume 12, Pages 280-295, ISSN 1573-1618, DOI 10.1007/s11119-010-9178-1
- [7] G. Nisha and J. Megala, "Wireless sensor Network based automated irrigation and crop field monitoring system," *Advanced Computing (ICoAC), 2014 Sixth International Conference on*, Chennai, 2014, pp. 189-194. doi: 10.1109/ICoAC.2014.7229707

[8]D. Archila Córdoba and F. Santamaría Buitrago, "ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES DE SENSORES INALAMBRICOS", *REVISTA DIGITAL TIA*, vol. 2, no. 1, pp. 4-14, 2013.

[9] C. Aranzazu Suescún and G. Moreno López, "REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS", *Revista Politécnica*, no. 8, pp. 94-111, 2009.

[10] A. Degada and V. Savani, "Design and implementation of low cost, portable telemedicine system: An embedded technology and ICT approach," *2015 5th Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE)*, Ahmedabad, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/NUICONE.2015.7449650

[11] Aqeel-ur-Rehman, Abu Zafar Abbasi, Noman Islam, Zubair Ahmed Shaikh, A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture, *Computer Standards & Interfaces*, Volume 36, Issue 2, February 2014, Pages 263-270, ISSN 0920-5489, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.004>.

[12]Tamoghna Ojha, Sudip Misra, Narendra Singh Raghuwanshi, Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 118, October 2015, Pages 66-84, ISSN 0168-1699, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011>

[13]F. Urbano, "Redes de sensores inalámbricos aplicadas a optimización en agricultura de precisión para cultivos de café en Colombia," *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 5, n.º 1, pp. 46–52, 2013.

[14]"BeagleBoard.org - bone", *Beagleboard.org*. [Online]. Available: <http://beagleboard.org/bone>.

[15]T. Lui, "Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)", *sparkfun*. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>.

[16]"Moisture Sensor (SKU: SEN0114) - Robot Wiki", *Dfrobot.com*, 2016. [Online]. Available: [http://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=Moisture\\_Sensor\\_%28SKU:SEN0114%29](http://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=Moisture_Sensor_%28SKU:SEN0114%29).

[17]"Hardware de Microsoft", *Hardware de Microsoft*, 2016. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/hardware/es-es/p/lifecam-hd-3000>.

[18]"Mini Adaptador USB Inalámbrico N 150Mbps TL-WN723N - Bienvenido a TP-LINK", *Tp-link.com*. [Online]. Available: [http://www.tp-link.com/ar/products/details/cat-11\\_TL-WN723N.html](http://www.tp-link.com/ar/products/details/cat-11_TL-WN723N.html).

[19] Rompemuros 2014 3 Antenas Estación de Alta Potencia [Online] Available [http://www.3bumen.com/es/iproductos/ver/G2/95/rompemuros\\_2014\\_3\\_antenas/](http://www.3bumen.com/es/iproductos/ver/G2/95/rompemuros_2014_3_antenas/)

[20] SolarCharger Model ES500 (Online) Available:  
<https://download.chinavasion.com/download/CVACC-S89-N1.pdf>

[21] MINAGRICULTURA. Colombia Siembra[Online]. 2016, vol.1. Available from Internet: <http://colombiasiembra.minagricultura.gov.co/>

[22] Adafruit Python DHT Sensor Library, GitHub [Online]. 2016. Available from Internet: [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_Python\\_DHT](https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_DHT)

[23] Black Lib, Beaglebone Black C++ library[Online]. 2015. Available from Internet: <http://blacklib.yigityuce.com/index.html>

[24] Gary Bradski, Adrian Koehler, "Learning OpenCV O'Reilly", 2008.

[25]Linux Media Subsystem Documentation [Online]. Available from Internet:  
<https://linuxtv.org/downloads/v4l-dvb-apis/>

[26] Repository for stand-alone RTL8188EU driver[Online]. Avariable from Internet:  
<https://github.com/lwfinger/rtl8188eu>

[27] Connmanctl man page[Online]. <https://www.mankier.com/1/connmanctl>